

## METHOD OF CONTROLLING OPERATION OF ROTARY MACHINE THROUGH DIAGNOSIS OF TROUBLE CAUSED THEREIN

Publication number: JP55101705

Publication date: 1980-08-04

Inventor: KURIHARA NOBUO; NISHIKAWA MITSUYO; KAWANO SHIGEYOSHI

Applicant: HITACHI LTD

Classification:

- International: **F01D19/00; F01D21/00; F01D19/00; F01D21/00; (IPC1-7): F01D19/00; F01D21/00**

- european:

Application number: JP19790007176 19790126

Priority number(s): JP19790007176 19790126

Report a data error here

### Abstract of JP55101705

**PURPOSE:**To prevent occurrence of accident through detection of trouble or malfunction of a rotary machine, by supervising out of detected vibration signals the condition of at least one component of vibration frequencies that is in a predetermined relationship with a component of revolutionary number of turbine generator. **CONSTITUTION:**Vibration caused by rotation of a rotary machine is detected by a vibration detector, and output of this vibration detector is furnished via a sample-hole circuit and an A/D converter 14 to FHT transformer 16 which utilizes a FHT (Fast Hadamard Transformer) for analyzing time-series input signals by use of square wave as reference signal. The FHT transformer 16 is connected to a zone-mean-frequency transformer 17 consisting of linear transforming unit 70, memory 71, multiplier M and adder add. From the transformer 17, there are produced DC component a0 in a frequency zone, means value a of sinusoidal wave and means value b of cosine wave. Operational condition of rotary machine is checked through supervising of these outputs of transformer 17, and in case that abnormal operation is detected, its cause is predicted.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

⑬ 日本国特許庁 (JP)

⑭ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報 (A)

昭55—101705

⑮ Int. Cl.<sup>3</sup>  
F 01 D 21/00  
19/00

識別記号

庁内整理番号  
7813—3G  
7813—3G

⑯ 公開 昭和55年(1980)8月4日

発明の数 1  
審査請求 未請求

(全 19 頁)

⑭ 回転機の異常診断による運転制御方法

⑰ 特 願 昭54—7176

⑱ 出 願 昭54(1979)1月26日

特許法第30条第1項適用 昭和53年11月13日  
発行異状検出予測技術シンポジウム報文集に  
発表

⑲ 発 明 者 栗原伸夫  
日立市幸町3丁目1番1号株式  
会社日立製作所日立研究所内

⑲ 発 明 者 西川光世  
日立市幸町3丁目1番1号株式  
会社日立製作所日立研究所内

⑲ 発 明 者 川野滋祥  
日立市幸町3丁目1番1号株式  
会社日立製作所日立研究所内

⑳ 出 願 人 株式会社日立製作所  
東京都千代田区丸の内1丁目5  
番1号

㉑ 代 理 人 弁理士 高橋明夫

明 細 書

発明の名称 回転機の異常診断による運転制御  
方法

特許請求の範囲

1. 回転機の運転状態における振動信号を検出し、  
該振動信号から該回転機の運転状態を診断する  
ものにおいて、検出された振動信号を周波数分  
析し、該回転機の回転周波数とあらかじめ定め  
られた関係にある少なくとも1つの周波数成分  
と、該回転機の回転周波数成分とのあらかじめ  
定められたパターンにしたがつて該回転機の運  
転制御を行なうことを特徴とする回転機の異常  
診断による運転制御方法。
2. 前記特許請求の範囲第1項記載において、該  
回転機の回転周波数の1/2に相当する周波数  
成分を監視し、該周波数成分に対応してあらか  
じめ定められた該パターンにしたがつて運転制  
御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断  
による運転制御方法。
3. 前記特許請求の範囲第1項記載において、該

(1)

回転機の回転周波数の1/3に相当する周波数  
成分を監視し、該周波数成分に対応してあらか  
じめ定められた該パターンにしたがつて運転制  
御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断  
による運転制御方法。

4. 前記特許請求の範囲第1項記載において該回  
転機の回転周波数の2倍に相当する周波数成分  
を監視し、該周波数成分に対応してあらかじめ  
定められた該パターンにしたがつて運転制御を  
行なうことを特徴とする回転機の異常診断によ  
る運転制御方法。
5. 前記特許請求の範囲第1項記載において、該  
回転機の固有振動周波数成分を監視し、該周波  
数成分に対応してあらかじめ定められた該パタ  
ーンにしたがつて運転制御を行なうことを特徴  
とする回転機の異常診断による運転制御方法。
6. 前記特許請求の範囲第1項記載において、回  
転機の固有振動周波数に対応した複数の危険速  
度の前後にあらかじめ定められた回転数領域を設け、  
該定められた回転数領域に応じて運転パターン

(2)

を定め、該運転パターンにしたがつて運転制御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

7. 前記特許請求の範囲第1項記載における運転パターンに振動周波数成分に応じて昇速領域、保持運転領域、当該速度に最も近い危険速度よりも低い回転速度領域に降速する降速領域、トリップ領域とを設けた運転パターンとし、該パターンにしたがつて速度制御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

8. 前記特許請求の範囲第1項記載において、検出された振動振幅信号を周波数分析し、回転周波数成分と、回転周波数の $1/2$ に相当する周波数成分と、回転周波数の $1/3$ に相当する周波数成分と、回転周波数の2倍に相当する周波数成分と、回転機の固有周波数成分とを同時に監視し、その中の最上位レベルの運転パターンで運転制御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

9. 前記特許請求の範囲第6項記載において、回

転機の定格回転数に至る領域に4つの回転数領域を定め、該4つの回転数領域に対応してあらかじめ定められた運転パターンにしたがつて運転制御を行なうことを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

10. 前記特許請求の範囲第2項記載において、回転周波数成分の $(\frac{1}{2} \pm r)$ に相当する領域の周波数成分を監視することを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。(ただし $r = 1, 2, \dots$ 自然数)

11. 前記特許請求の範囲第3項記載において、回転周波数成分の $(\frac{1}{3} \pm r)$ に相当する領域の周波数成分を監視することを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。(ただし $r = 1, 2, \dots$ 自然数)

12. 前記特許請求の範囲第4項記載において、回転周波数成分の $(2 \text{倍} \pm r)$ に相当する領域の周波数成分を監視することを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。(ただし $r = 1, 2, \dots$ 自然数)

(4)

13. 前記特許請求の範囲第5項記載において、回転機の固有振動周波数の前後 $r$ にわたる領域の周波数成分を監視することを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

14. 特許請求の範囲第8項記載において、検出された振動信号をEHT処理により交番数スペクトラムを算出し、該スペクトラムの正常値と比較しその偏差があらかじめ定められた値を超えたとき当該回転数に応じてあらかじめ定められた運転パターンを選択し、該スペクトラム信号をWFT処理し、対応する運転モードに応じて速度を制御することを特徴とする回転機の異常診断による運転制御方法。

発明の詳細な説明

本発明は回転機の運転制御方法に係り、特に振動信号を検出し回転機の状態を診断しながら速度制御を行なう回転機の異常診断による運転制御方法に関する。

本発明は蒸気タービン、発電機などの大型回転機の運転制御の中で、特に起動時における振動状

(5)

態を監視しながら運転を行なう制御方法に関する。

回転機の振動問題は特に火力発電所の運転保守に大きな比重を占め、その原因究明ならびに対策には何と云つても正確な状況の把握と綿密な技術的検討を要するものである。近年のように蒸気タービンの大容量化に伴ない軸受中心間距離、ローターの重量、車室数などの増加のために所謂振動問題は一層複雑化する傾向にある。

また電力系統制御が、原子力発電プラントでベース負荷を分担させる方向への移行に伴つて火力発電プラントを中間負荷調整用として運転する様相が強まってきた。これまでの週間負荷調整用から最近では昼間負荷調整のために、火力の中容量機といえども深夜の需要の少ない時間帯にはプラントを停止させることがある。このようなプラントの起動停止時の運転では、定常運転時と比べて異常状態が発生しやすい。特に、タービン起動時には熱的アンバランスに起因する異常振動が発生しやすい。蒸気タービンあるいは発電機の運転で、運転員が最も注意を要するのは起動時

(6)

あつて、この時に異常振動が発生した場合の処置は重要な問題である。適切な処置や、そのタイミングを失うと蒸気タービンのような高速回転体では重大な事故をひきおこしかねないのである。

また定常運転時においてもその異常をいち早く検知するとともに、適切な処置をタイミングよく行わないと重大な事故に発展しかねない。これとても起動時における場合と同様の問題である。

この発明は、これらの回転体の正常、あるいは異常状態を、例えば軸受部に取付けられた振動検出器による振動信号の状態を監視して判定し、運転制御を行なうものである。

本発明はこのような背景においてなされたものであつて、振動検出信号を分析してその要因を把握しながら安全な運転制御を行ない重大事故の発生を未然に防止するものである。

蒸気タービンの起動時において、タービン速度制御装置はタービンの目標回転数および目標とする回転数変化率に従つて主蒸気弁あるいはバイパス弁などを操作し、回転数を次第に上昇させるよ

(7)

がつて前記第2の方法のように一律にその回転数で保持することはむしろ非常に危険な場合が少なくない。

次に第3の方法であるが、回転体にとっては安全な方法であるが、不要なトリップをも行なつてしまう可能性がある。振動要因は、熱的なアンバランス、機械的なアンバランス、潤滑油の状態、あるいは回転数など多くの項目があつて、正常、異常の予知は難しい。したがつて場合によつては前記第2の方法のようにある回転数で保持することによつて安全振動領域に収束することもありうるから、第3の方法を多用することは不要なトリップを行なうことになつてしまう。逆にこれを避けようとするに判断基準をゆるめると、異常時に適切な処置が遅れてしまう欠点がある。

ただここで注意しなければいけないのは、トリップを避けてその回転数を保持することが安全かどうかを見極めることが必要である。したがつて危険速度領域で回転数保持することはなく、現在どんな領域の回転数かを判断し、振動要因として

(9)

うに制御する。

しかし従来は昇速中に振動が発生すると、その振動信号の振幅の大きさにより従来は次の3つの制御方法をとつていた。その第1は速度制御装置による昇速制御を中止して、運転員の判断による運転、すなわち手動制御運転に切替えてしまうこと、第2の方法は、振動発生時の回転数を保持し、昇速制御を行なわない方法、そして第3の方法は、タービンを停止せしめる、である。

第1の方法は、手動制御に切替えてしまうために運転員の判断に全てまかされてしまう。したがつてその分野での熟練運転員が必要であるし、個人差による運転制御の相違もあるから決して好ましいものではない。

第2の方法は、回転体の運転では固有振動数という問題があつて、振動発生時の回転数に保持することが必ずしも得策でないのである。

タービンおよびこれに直結されている発電機から成る回転体の固有振動数から決まる危険速度領域では振動が増大することが知られている。した

(8)

どんな兆候が現われているかなどの診断をした上でないと効果がない。

また上述のような振動要因のうち機械的なアンバランスに対してはあらかじめ対策をして、出来るだけ振動発生をおさえることが試みられている。

例えば、J. W. Lund, J. Tonnesen :

"Analysis and Experiments on Multi-Plane Balancing of a Flexible Rotor", ASME Paper No. 71-Vibr-74 (ASME Vibrations Conference, Tront, Canada, September 8-10, 1971) がある。この論文では回転体のいくつかの場所で振動を検出するとともに、回転速度を検出して、最小2乗法などを利用して補正重量を計算し、バランスをとる方法が述べられている。そして振動測定については Schematic diagram of instrumentation として Fig. 4 に示され、それに関する説明を "Instrumentation" の項 (p. 3~4) で述べている。

また A. Clapis et al. "Early Diagnosis

(10)

of Dynamic Unbalances and of Misalignments in Large Turbogenerators

Energy Nucleare, Vol. 23/n. 5/maggio 1976, p. 271 ~ 277. には大型タービン発電機の動的アンバランスと軸心ずれを測定し、これを故障に対する早期診断法として応用した例が示されている。この論文ではその2つの測定法、監視と早期診断のための信号処理、回転速度に対する回転体のアンバランスによる振幅とその位相の関係などについて述べている。

特に Fig. 2 には近接スイッチの取付状態が示され、Fig. 3 には信号処理についてのブロック図が示されている。近接スイッチからの信号をあらかじめ定められたバンドパスフィルタ (BP) を経由して、信号変換されることが示されている。ここでは振動位相信号や振動実効値信号などを直流成分に変換して記録することを述べている。

このように従来は振動信号を平滑し、直流成分として扱っている例がほとんどである。しかしこれらの信号処理では、例えば異常を診断するに

(11)

得策とは云えない。

以上、従来技術について述べたが、異常診断の結果に基づく制御としては、(1)手動制御への切換元、(2)現回転数保持、(3)トリップなどであり、信号処理には平滑された平均値信号すなわち直流信号で診断することが行なわれている。

信号処理として平均値信号を利用することは簡便な方法である反面、平均値として信号が変化しなければ診断出来ないという欠点がある。すなわちある特定の周波数成分が増加し、他の特定周波数成分が減少したような場合、結果として平均値が変らなければ何ら状態変化が起っていないと判断してしまうおそれがある。

しかし実際には平均値として変化しなくても、ある特定の周波数成分が増加したことを問題視しなければいけない場合が少なくない。またそのこと自体は直ぐに異常につながらなくても、ある異常の徴候が現われていることを、我々は経験的に把握している。

したがって、振動信号の全周波数成分の平均値

(13)

特開 昭55-101705(4)

でも、予想される数多くの要因を総括して診断することになつてしまい、きめ細かい診断が出来難いという欠点がある。

また、実際にタービン起動運転に適用したもの例として、F. H. Barratt et al の "ACTUS, An Automatically Controlled Turbine Run-up System" AEI Engineering, September/October, 1962, p. 255 ~ 258 がある。

これは AEI で開発した装置 ACTUS について述べ、例えば第 255 頁 ~ 第 256 頁にわたる "Problems of starting large steam turbine" の項ではタービン昇速運転について述べている。軸偏心や、振動、蒸気と金属間の温度差が通常の制限から外れることなどの監視してタービンを昇速すること、そしてタービンの速度がどんな速度になつていたとしても、まずその速度を保持する速度制御方法について明らかにしている。これは前述の、異常にともなり保持制御方法であつて、すでに明らかにしたように必ずしも

(12)

で診断した場合には、正確にしかも現象に忠実な診断が出来ないという欠点がある。本発明はこの点に着目してなされたもので、実情に合った適切な診断のもとに安全なタービン発電機の運転制御、特に起動運転制御を行なうことにある。以下順次説明する。

本発明は火力・原子力発電プラントにおける蒸気タービンおよび発電機などの大型回転機の制御方法に係り、特に起動あるいは定常運転時における振動を検出し、検出された振動信号を分析して正常運転状態かあるいは異常状態かを判定するとともに、異常の場合はその要因が何に起因するものかを検知あるいは予測して回転機の昇速、降速あるいは停止などの運転制御を行なう制御方法および装置に関する。

本発明の主たる目的はあらかじめ定められた振動周波数成分を監視し、回転体特にタービン発電機の運転状態を診断することにある。

本発明の1つの目的は起動時における複数のあらかじめ定められた運転回転数領域においてあら

(14)

かじめ定められた少なくとも1つの振動周波数成分を監視して状態診断を行ない、タービン発電機の速度を制御する運転制御方法を提供するにある。

本発明の他の目的は、特に起動時において、特定周波数成分を監視して異常の予測診断を行ない昇速、降速、保持などの運転制御を行なうことにある。

本発明の特徴は、検出される振動信号の中から、タービン発電機の回転数成分に対してあらかじめ定められた関係にある少なくとも1つの振動周波数成分の状態を監視して回転体の状態を診断することにある。

本発明の他の特徴は、検出される振動信号の、回転数成分に対しあらかじめ定められた関係を有する複数の周波数成分相互の相関関係からタービンおよび発電機の状態を監視診断することにある。

本発明の他の特徴は、回転体の起動から定格回転数に至るまでに含まれる回転体の固有振動から定まる危険速度領域の前段において、回転数周波数成分とあらかじめ定められた関係を有する周波

(15)

それにはどんな信号から異常診断を行なうかが問題になるが、ここではまず軸受上に取付けられた検出器からの振動信号の分析手法について簡単に述べる。

第1図は大型のタービン発電機の1例を示すもので、高圧タービンHP、中圧タービンIP、低圧タービンLP、発電機が直結されている場合を示している。1~6はそれぞれベアリングで、このベアリング部に振動検出器が取付けられる場合がほとんどである。

その振動検出器の取付状態の1例をFig. 2に示す。11は回転体、12は振動検出器、13はサンプルホールド回路、14はアナログデジタル変換器(A/D converter) 15はFFT (Fast Fourier Transform) 変換器を示す。信号線のうち101は振動振幅アナログ信号であり、102は振動振幅のデジタル信号、103は振動周波数全スペクトル信号であり、Fig. 2の振動検出器は接触式のように表わされているが、機器の振動を検出するものであれば非接触式であ

(17)

特開 昭55-101705(5)

数成分の状態を診断して、回転体を運転制御を行なうことにある。

本発明の他の特徴は、回転体の回転数周波数成分、およびその1/2調波成分、奇数次調波成分、倍調波成分の状態を診断して回転体の起動運転制御を行なうことにある。

本発明の他の特徴は、検出された振動信号の全周波数成分のスペクトル分析を行ないタービン発電機の回転状態を診断することにある。

本発明の他の特徴は、昇速領域、保持運転領域、当該運転速度に最も近い危険速度以下の速度まで降速する運転領域、トリップ領域の4つから成る運転パターンにしたがって運転を行なうことにある。

以下本発明を実施例により詳細に説明するが、はじめに本発明の周波数成分の分析による異常診断の基礎となる事項について述べる。

大型回転機、特に大容量化の傾向にあるタービン発電機ではその異常を早めに診断し、しかるべき対応処置をとることは極めて重要なことである。

(16)

つてもよいことは当然である。

ところで第2図にFFTの場合を示したが、回転機の異常診断のように複数の要因が複雑に関連しあっているような場合に適用している。その理由は、時系列信号から周波数領域に変換することにより主要原因の特徴抽出が容易となることが分り、最近では工場試験や据付調整あるいはトラブル発生時に、オフラインで高速フーリエ変換を利用する試みがなされてきている。例えば日本国特許庁公開特許公報昭和47年第1411号、「高速フーリエ変換データ処理装置」(出願人IBM、対応米国特許出願Se. No. 52332号、1970年7月6日出願)には、離散的フーリエ変換を使用した数値的問題解決法のうち、特に離散的フーリエ変換計算のための種々の高速フーリエ変換アルゴリズムのハードウェア化について述べている。この記載のものは回転機の異常診断とは関係ないが、FFTの詳細が述べられている。FFTについての詳細はこの文献にゆずり、ここでは以下に簡単に述べる。

(18)

周知のように(1)式の離散的 Fourier 変換式において、Fourier 行列  $F$  の行置換および Good の因数分解公式などにより高速化して演算する。フーリエ係数  $a$  は

$$a = \frac{1}{N} F \cdot X \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$N$  : 標本数

$F$  : フーリエ行列

$X$  : 時系列信号

さらにこれらは式(2), (3)で表わされる。

$$a^T = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{l+1, l} &= W^{1, l} \cdot \Delta W^l \\ W &= \exp(-j2\pi/N) \\ \Delta W &= \exp(j\pi/N) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

$T$  : 転置

$l$  : 周波数または調波数

$l, l = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1)$

時系列信号  $X^T$  は

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{pmatrix} \quad (19)$$

時連続監視する異常診断用として採用するには、上述のように時系列信号の全周波数のスペクトルが容易に求められるという長所がある反面、次のような欠点がある。

その第1は前記(3)式における  $W (= \exp(-j2\pi/N))$  の乗算を  $\frac{1}{2}N \log N$  回演算することが必要であり、制御用計算機で実時間で演算するには負担が大きい。(ここで、 $N$  はサンプル数。)その第2は全周波数スペクトルは得られるが、その分布内容から運転員が判断して要因分析することが必要であり、緊急時には無理がある。

なお、第1の欠点に対しては、専用ハードウェアで構成されたFFTを用いて高速化する方策があるが、ソフトウェアによる場合に比してコスト高となる欠点がある。ハードウェアが安くなれば利用価値が大きいものと思われる。

これに対し、矩形波を参照波として時系列入力信号を解析する Fast Hadamard Transformer (以下FHTと略記する)を利用して周波数分析(正しくは交番数分析)を行なう方法がある。な

(21)

$$X^T = [x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N-1}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

で例えば振動波形の時系列信号である。

$\Delta W$  はサンプリング点の中央部で分析するための位相補正用オペレータである。

$$F = \begin{pmatrix} F_0 \\ \vdots \\ F_l \\ \vdots \\ F_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W^0 & W^0 \Delta W & W^0 \Delta W^2 & \dots & W^0 \Delta W^{N-1} \\ W^1 \Delta W & W^1 \Delta W^2 & W^1 \Delta W^3 & \dots & W^1 \Delta W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W^{N-1} \Delta W^{N-1} & \dots & \dots & \dots & W^{N-1} \Delta W^{N-1} \end{pmatrix} \quad (15)$$

FFT変換器を用いれば、時系列信号の全周波数スペクトルを容易にもとめられることから、一般に利用される傾向にある。ただしタービンおよび発電機のオンライン診断を行なうような場合には、正常、異常を問わず連続的な常時監視が必要である。緊急時の対応に役立てるには異常の要因分析に直結された解析結果であることが要求される。

すなわち従来技術のFFTアルゴリズムを、常

(20)

にFHTはWalsh-Hadamard Transformer (WHTと略記)とも云われている。

この周波数分析手法そのものについては例えば Nasir Ahmed et al の "BIFORE or Hadamard Transform" (IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics, September 1971, p. 225~234) を参照されたい。

第3図にFHTを利用した場合のブロック図を示す。FHT変換器は16である。17は帯域平均周波数変換器8は振動診断装置である。

時系列デジタル信号をFHT変換した交番数係数  $A$  なる信号104を入力信号とし、あらかじめ定められた線形変換係数  $K$  をもとに帯域周波数スペクトル信号を求めるか、あるいは平均線形変換係数  $\bar{K}$  をもとに帯域平均周波数スペクトル信号105を得る。 $K, \bar{K}$  についてはさらに後述する。

ここでFHTについて簡単に述べる。

時系列入力信号の処理を行なうFHT方式は、交番数係数  $A$  を出力する。この交番数係数  $A$  は、

(22)

以下のように定義される。

$$A = N^{-\frac{1}{2}} T [G_1] [G_2] \dots [G_n] X \dots \quad (6)$$

$$n = \log_2 N$$

ここで、

$$\text{交番数係数: } A^T = [A_1, A_2, \dots, A_N]$$

ただし  $T$ : 転置

置換行列:  $T$

$$[G_i] = E^{(i-1)} \otimes H^{(i)} \otimes E^{(n-i)}$$

ここで、 $\otimes$  は Kronecker 積 (PRODUCT) を示す。

$$\text{対角行列: } E^{(n)} = I$$

$$\text{アダマール行列: } H^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

ところで Walsh and Fourier Transfer (以下 WFT と略記する) は交番数係数  $A$  を (7) 式によりフーリエ係数  $a$  に変換する方法である。

$$a = K \cdot A \quad (7)$$

ここで線形変換係数  $K$  は (8) 式で与えられる。

$$(23)$$

$a$  を求めるのではなく、(9) 式に従って任意の帯域平均周波数  $\bar{a}$  を求めるようにしたものである。数式で示すと、下記の通りとなる。

$$\bar{a} = \bar{K} \cdot A \quad (9)$$

ここで、平均線形変換係数

$$\bar{K} = [\bar{k}_{1,1}, \bar{k}_{1,2}, \dots, \bar{k}_{1,N}, \dots, \bar{k}_{m,1}, \bar{k}_{m,2}, \dots, \bar{k}_{m,N}]$$

$$\bar{k}_{p,j} = \frac{1}{m_p} \sum_i k_{i,j}$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, N)$$

ただし、 $\sum$  は、任意に  $m_p$  を選択できる。

上述の平均線形変換係数  $\bar{K}$  は、対象とする事象や条件によつて種々の値をとる。われわれが経験的に把握した回転機械の異常振動に対する平均線形変換係数  $\bar{K}$  の選定例を第 1 表に示す。

$$(25)$$

$$K = \frac{1}{N} F \cdot H \quad (8)$$

(8) 式から明らかのように加、減算処理のみでよいから、正弦あるいは余弦の複素数乗算などを行わねばならない FFT に比較して同一の演算処理で演算時間を比較すると 1/10 以下である。これは特に回転機のオンライン異常診断のような場合には特に好適である。例えばタービンの起動時における診断には特に威力を発揮する。

$F$  及び  $H$  は  $N$  次のフーリエ行列、アダマール行列である。即ち、FHT 方式によれば、交番数係数出力  $A$  は、線形変換係数  $K$  を利用することによつて周波数成分を示すフーリエ係数に変換できることになる。

これらの基礎的事項のもとに、本発明を実施例により説明する。

はじめに検出された振動信号の分析、異常診断について述べる。

本発明は前述の FHT を用いることを基本にしているが、高速化を実現するために全周波数係数

$$(24)$$

第 1 表

| p | 振動要因          | $\bar{K}_p$ の選定基準               | $\bar{K}_p$ の選定例                                |
|---|---------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 | 軸受部ミスマウント     | 分数調波振動<br>偶数次<br>$\frac{1}{2}R$ | $i = 29, 30, 31$<br>14, 15, 16<br>( $m_1 = 6$ ) |
| 2 | カップリングのゆるみ    | 分数調波振動<br>奇数次<br>$\frac{1}{3}R$ | $i = 19, 20, 21$<br>11, 12, 13<br>( $m_2 = 6$ ) |
| 3 | 軸受油膜特性による自励振動 | 危険速度<br>( $R_c$ )               | $i = 21, 22, 23$<br>( $m_3 = 3$ )               |
| 4 | ラビングによる熱曲がり   | 回転速度<br>( $R$ )                 | $i = 59, 60, 61$<br>( $m_4 = 3$ )               |
| 5 | 剛性の不平衡        | 倍調波振動<br>( $2R$ )               | $i = 119, 120, 121$<br>( $m_5 = 3$ )            |

$R$ : 回転数成分を示す  $R_c$ : 固有周波数

第 1 表は高速回転体である火力原子力発電所に

$$(26)$$



おけるタービン及び発電機の平均線形変換係数  $K$  の事例を示している。異常振動要因としては、5個に大別され、①軸受部ミスアライメント、②カップリングのゆるみ、③軸受油膜特性による自励振動、④ラビングによる熱曲がり、⑤剛性の不平衡、である。これらの各要因に基づき異常振動の周波数を解析してみると、それぞれが特定の周波数領域をとることがわかった。即ち、分数調波振動とか、倍調波振動とかに周波数成分（スペクトル）が要因別に発生することがわかった。従つて、分数調波成分とか倍調波とかに応じて周波数成分を求めれば、その要因の様子を知ることができることになる。

第1表はこれらの関係を示すものである。そしてFHTは、従来のFFTに比較して、大巾な処理時間の短縮が可能であることをすでに述べたがこれは、FFTの演算の大部分を占める乗算ステップが、FHTの処理の過程ではほとんどなくなるためである。

次に、FHT変換器16と帯域平均周波数変換

(27)

式に従つてなされる。

$$\left. \begin{aligned} u(0) &= X_0 + X_4 \\ u(1) &= X_1 + X_5 \\ u(2) &= X_2 + X_6 \\ &\vdots \\ u(6) &= X_2 + X_6 \\ u(7) &= X_3 + X_7 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

次いで、(10)式で求めた  $u$  をもとに、要素  $u'$  の演算を行う。この要素  $u'$  の演算は以下の(11)式によつてなされる。

$$\left. \begin{aligned} u'(0) &= u(0) + u(2) \\ u'(1) &= u(1) - u(3) \\ &\vdots \\ u'(6) &= u(4) - u(6) \\ u'(7) &= u(5) - u(7) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

以上の演算を  $n$  回 ( $n = \log_2 N$ 、但し、 $N$  は標本数) 繰返すことにより、交番数係数  $A(0)$ 、 $A(1)$ 、 $\dots\dots$ 、 $A(7)$  (一般式  $A(k)$ ) が求まる。尚、図で add は加算部、sub は減算部を示す。

以上の第6図のFHT変換器16の出力  $A(0)$ 、

(29)

器17との関係をより具体的に説明しよう。第4図は横軸が時間  $t$ 、縦軸が振動振幅  $X$  で表わされる事象の振動振幅特性を示す。図では、時間  $t_0, t_1, \dots, t_7$  の8個のサンプル時間に対する  $X_0, X_1, \dots, X_7$  の8個の標本数を考えている。かかる標本数の振動振幅  $X$  は、サンプルホールド回路13を通して取り込まれ、A/D変換器14によりデジタル信号に変換される。第5図は、A/D変換器14とFHT変換器16と帯域平均周波数変換器17との対応による細部の関係を示す図である。帯域平均周波数変換器17は、線形変換部70とメモリ71と乗算器Mおよび加算器addから成る。

第5図でaddは加算器を示し、subは減算器を示す。減算器でのシンボルは、この信号線の信号を減算することを意味している。Mなるシンボル図は乗算器である。FHT変換器16の細部構成を第6図に示す。A/D変換された振動振幅  $X$  は、メモリ(図示せず)に記憶され、次いで、要素  $u$  の演算を行う。この要素  $u$  の演算は、下記の

(28)

$A(1), \dots, A(7)$  をフーリエ係数  $a_0, a_1, b_1, \dots, b_4$  に変換するには、変換係数を利用する。この変換係数の一例を第2表に示す。

第 2 表

|       | $a_0$ | $a_1$     | $a_2$    | $a_3$     | $a_4$ |
|-------|-------|-----------|----------|-----------|-------|
| $A_0$ | 1.0   |           |          |           |       |
| $A_1$ |       | 1.306563  |          | -0.541197 |       |
| $A_2$ |       |           | 1.414213 |           |       |
| $A_3$ |       | 0.541196  |          | 1.306562  |       |
|       | $b_0$ | $b_1$     | $b_2$    | $b_3$     | $b_4$ |
| $A_1$ |       | 1.306563  |          | 0.541197  |       |
| $A_2$ |       |           | 1.414215 |           |       |
| $A_3$ |       | -0.541195 |          | 1.306563  |       |
| $A_7$ |       |           |          |           | 1.0   |

かかる変換係数を用いてフーリエ係数  $a, b$  を求めると、次式の(12)式となる。

(30)

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ b_1 \\ a_1 \\ b_2 \\ a_2 \\ b_3 \\ a_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 \\ 1.306563A_1 - 0.541195A_2 \\ 1.306563A_2 + 0.541195A_1 \\ 1.414215A_3 \\ 1.414213A_4 \\ 0.541197A_1 + 1.306563A_2 \\ -0.541197A_2 + 1.306563A_1 \\ A_7 \end{bmatrix} \quad \dots (12)$$

(12)式で  $a_0$  は直流成分、 $a_1, a_2, a_3, a_4$  は正弦波成分、 $b_1, b_2, b_3, b_4$  は余弦波成分となる。尚、第2表で、小数点5桁目以降を四捨五入しても実用上、値はほとんど同じである。その結果、(12)式で使用する変換係数は、1.3066, 0.5412, 1.4142, 0.5412, 1.3066の5個の数値となる。従つて、この5個の変換係数を記憶させておき、フーリエ係数  $a, b$  を求める際に、(12)式を利用してフーリエ係数  $a, b$  を求めることになる。以上の、交番数係数からフーリエ係数を求める過程は、従来からある

(31)

$$\left. \begin{aligned} 1.8478 &= 1.3066 + 0.5412 \\ 0.7654 &= 1.3066 + 0.5412 \\ 1.4142 &= 1.4142 \end{aligned} \right\} \dots (16)$$

である。(14), (15)式を求めるのに必要なデータは、1.8478, 0.7654, 1.4142の3個でよい。この3個のデータが帯域平均の変換係数となる。

第5図の帯域平均周波数変換器17では、メモリ71に上記3個のデータを記憶させておく。更に、線形変換部70では、メモリ71のデータと交番数との間で掛算を行わせ、次いで加算を行い、(14), (15)式の演算を行い、 $\bar{a}, \bar{b}$ を求める。かかる実施例によればメモリ容量が少なく平均周波数スペクトルの検出ができる。

以上は、平均値として、正弦、余弦成分に関するものであつたが、各種調波成分の平均値も同様に可能となる。更に、標本数  $N$  が増大すれば、より精度の高い帯域平均が可能となることは言うまでもない。一般には、 $N: 256, 512, 1024, \dots$ 等が実用的である。交番数係数  $A$

(33)

FHTと、線形変換の組合せによる本発明では、(12)式に従つて、個々のフーリエ係数を求めるのではなく、周波数帯域の平均としてフーリエ係数を求めることにしたものである。従つて、第5図に戻つて本発明の実施例を説明しよう。

周波数帯域として、直流成分、正弦波の平均、余弦波の平均を考えよう。直流成分  $a_0$  は上述の説明で明らかなように変換係数は1であるため、

$$a_0 = A(0) \dots (13)$$

となる。正弦波の平均値  $\bar{a}$  は、

$$\begin{aligned} \bar{a} &= a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \\ &= 0.7654 A(2) + 1.4142 A(4) \\ &\quad + 1.8478 A(6) \dots (14) \end{aligned}$$

となる。余弦波の平均値  $\bar{b}$  は、

$$\begin{aligned} \bar{b} &= b_1 + b_2 + b_3 + b_4 \\ &= 1.8478 A(1) + 1.4142 A(3) \\ &\quad + 0.7654 A(5) + A(7) \dots (15) \end{aligned}$$

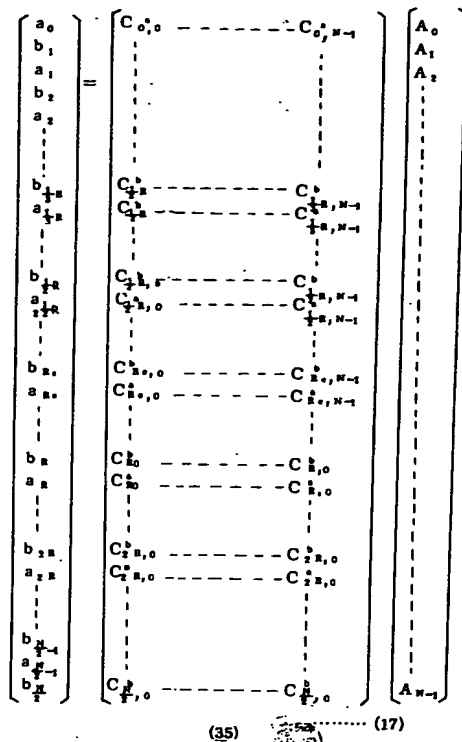
となる。

但し、

(32)

から周波数成分を示すフーリエ係数  $a$  に変換する一般式(標本数  $N$  の場合)は(17)式となる。

(34)



(35)

(17)式において、 $R$ ：回転数成分、 $R_c$ ：固有周波数成分を示す。さらに周波数スペクトルに変換するには、(18)式に従って演算する。

$$|a_i| = 10 \log_{10} \sqrt{b_i^2 + a_i^2} \quad (18)$$

たとえば、 $\frac{1}{2}$ 回転数成分  $P_{1/2}$  は

$$|a_{1/2}| = 10 \log_{10} \sqrt{b_{1/2}^2 + a_{1/2}^2} \quad (19)$$

となる。

以上の実施例によれば、第1表に示す如き振動要因に対して、帯域として周波数特性を求めることが可能になつたため、振動要因の適切な把握、及び対策が可能になつた。

次に本発明は、計算機によつても達成できる。その際のフローチャートを第7図に示す。先ず、フロー501で時系列信号  $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$  を取り込む。次いで、フロー502で交番数係数  $A$  を  $A = N^{-1} T [G_1, \dots, G_N]$  で  $X$  により求める。次いで、平均変換係数  $\bar{K}$  をもとに、帯域平均フーリエ係数  $\bar{a}$  を  $\bar{a} = \bar{K}$  とし、

(36)

$A$  を求める。この処理をもつて上記実施例の処理と同じとなる。次に、チェックに移る。即ち、フロー504で帯域フーリエ係数  $\bar{a}$  が許容値  $L$  (異常判定レベル) 内にあるかどうかのチェックを行い、満足していればフロー506に移り、標本数の全部の走査が終了したかどうかのチェックを行い、走査が終了していなければフロー507に移る。終了していれば次の標本に対する処理を待つ。フロー504で満足していなければ、その時の状態をフロー505で表示させる。以上の過程でのチェック過程は、第5図の場合にも適用できる。

次に、本発明の他の実施例を説明しよう。第8図は、前述した従来のFHTと線形変換との組合せた場合に対する実施例を示す。従つて、変換部17は(12)式の演算を行うように構成されている。本実施例の最大の特徴は、変換部16と17との間に比較部19を設けた点にある。比較部19は、交番数係数に対応した数の比較器を持つている。各比較器は対応する交番数係数とあらかじめ設定

(37)

された交番数係数毎の許容値  $A_i$  とを入力とし、両者の比較を行うようになっている。交番数係数の許容値  $A_i$  は、異常振動の要因に応じてそれ以上の値を超えた場合、異常であると認定できる基準値である。比較器では各交番数係数  $A_i$  に対して許容値  $A_{i0}$  (この場合  $A_0 \sim A_{N-1}$ ) との比較を行い、許容値との差がある定められた巾  $M$  よりも小さい場合には出力を出さず、大きい場合には異常として、その時の交番数係数  $A_i$  を出力する。変換器17では、異常として判定された交番数係数を利用してそれに関連するフーリエ係数を求める。このフーリエ係数の結果について、再度異常か否かのチェックを行う。即ち、以上の実施例では、交番数係数について第1次の異常チェックを行い、異常と判定された場合、フーリエ係数を求めて、第2次の異常チェックを行うことになる。尚、1つの交番数係数のみが異常と判定された場合、フーリエ係数を求めるには他の交番数係数をも演算に必要となる ( $a_0$  は例外)。従つて、それらの交番数係数をも取り込んでフーリエ係数

(38)

を求めなければならない。これらは、図では示さないが、制御回路によつて比較器のそれぞれの結果が点検され、比較器の出力を出すかどうかのチェックがなされる。

第9図は計算機によつて実現した場合の実施例をフローチャートによつて示している。フロー508では、許容値 $A_m$ と各交番数係数 $A_n$ との偏差を求めている。次いで、フロー509でその偏差 $\epsilon$ が値 $M$ 、以下であるかどうかのチェックを行う。以下であれば、フロー506に移り、以上であればフロー510に移り、フーリエ係数を求める。次いで、フロー511により表示する。これらの実施例は帯域平均の場合にも適用される。この時にも、変換器16と17との間に比較部19が設けられる。

以上、主として検出された振動振幅信号処理について述べたが、次にこれらの信号処理による診断結果に基づくタービンおよび発電機の運転制御について述べる。

第10図は全体のブロック図を示している。

(39)

ジュール装置からの信号を補正して述べたが、あるいはスケジュール信号に優先して設定し、タービンの速度を制御すると云つてもよい。

第11図は振動診断装置48の具体的な構成例を示す。216、217は帯域フィルタ、218はマルチプレクサ、219はサンプルホールド、220はA/D変換器、221は回転に同期して発生するタイミング発生回路、222はフーリエ変換器、223はフーリエ変換した信号により回転体の状態を判別する判別器で、診断器224はフーリエ変換器222と、判別器223から構成される。信号204はアナログの軸振動信号、信号205はデジタル軸振動信号、206は調波数スペクトル信号を、207は診断結果に基づく目標値設定信号で目標回転数設定装置47に入力される。そして信号源208はマルチプレクサの切替信号源で、この信号によつてマルチプレクサの切替が行われ、複数の振動検出信号を順次切替えて取込む動作を行なわせる。

第12図はその波形の1例を示す。同図(a)は振

(41)

HPなる高圧タービン51、IPなる中圧タービン、LPなる低圧タービン53、およびGなる発電機53が直結されている例である。39は回転数検出器を、40~45はそれぞれ軸受に取付けられた振動振幅検出器である。48は振動振幅値信号から回転機種の診断を行なう振動診断装置を、47は目標回転数設定装置で、速度制御のための起動スケジュール装置46からのスケジュール信号を、回転体の振動信号(検出器40~45で検出される信号)による診断結果に応じて補正するものである。55は47による設定信号に基づいてタービンの速度を制御するタービン速度制御装置である。図は弁MSV-SV64を操作するモータ、MSV-SVは主蒸止弁の補助弁をMSVは主蒸止弁を、CVは制御弁を示している。

タービン速度制御装置は回転数検出器39からの信号203と設定装置47からの信号の偏差に応じて、主蒸気止バイパス弁64を制御して所定の回転数になるようにタービン51への蒸気流入量を制御する。先に診断結果に応じて起動スケ

(40)

動検出器によつて検出される軸振動信号の1例で例えば第11図の信号201の場合を示している。同図(b)は帯域フィルタを通過したあとの信号で、高調波成分が除去されていることが分る。例えば第11図の信号204がこれに相当する。

また同図(c)はサンプルホールド回路の出力信号で第11図の信号204'がこれに相当する。また同図(d)はA/D変換器で変換されたデジタルの軸振動信号で、第11図の信号205がこれに相当する。(d)ではサンプルホールド回路の出力信号204'に対して11ビット(但しMSBはサインビット)構成のデジタル信号に変換した場合の例について示している。

これらの時系列デジタル信号はすでに述べたように、例えばFHTの場合であればFig. 6の $X_0, X_1, X_2, \dots, X_7$ に代入されて要素 $u$ の演算が行われ、交番数係数 $A(0), A(1), A(2), \dots, A(7)$ を求める。そしてフーリエ係数 $a_0, a_1, b_1, \dots, b_4$ に変換するには例えば第2表に示した変換係数を用いる。ここでは簡単な

(42)

ために前記標本数  $N = 8 (X_0, X_1, X_2, \dots, X_7)$  の場合であるが、実際には前記したように 256, 512, 1024 などが採用される。

第 13 図(a)はタービン発電機の起動時における振動振幅の状況を示したものである。定格回転数に達するまでにはいくつかの危険速度領域がありそこで振動振幅が増加していることが分る。一般には 1 次危険速度が 1000 rpm 近傍、2 次危険速度は 2000 rpm、3 次、4 次、5 次危険速度は 3000 ~ 3400 rpm 近傍にある。

第 13 図(b)は起動時における一般的な昇速パターンを示している。(A)~(D)は同図(a)の(A)~(D)にそれぞれ対応している。本発明ではこれらの過渡速度領域で振動信号の周波数分析を行ない、全周波数スペクトル分析結果によるタービン発電機の状況を診断するか、あるいは第 1 表に示したように回転数成分と一定の関係をもつ特定の周波数成分の状況を分析して診断し、運転制御を行なう。

例えば第 14 図はしきい値を設定して診断を行なう場合を示している。横軸は回転数成分で振動

(43)

の(D)領域にあつたとすると、(D)の速度領域まで速度を下げて運転することをいう。これは H 領域にあつても、ある定められた時間だけ保持運転が継続されると、丁度 D 領域の運転状態と同様の降速運転を行なうことを意味する。

D は上述したように第 13 図で(D)領域で第 14 図の D に達すると、第 13 図で(D)領域まで速度を下げて運転することである。

第 14 図では回転数成分と  $1/2$  回転数成分との関係を示したもので、たとえ  $1/2$  回転数成分が小さくても回転数成分が増加すればやはりトリップに至ることがある。それは第 1 表から明らかのように、軸受部ミスアライメントとは異なつた振動要因、例えばラビングによる熱曲がりによる異常などが発生していると診断するわけである。第 14 図は回転数成分とその  $1/2$  回転数成分との関係であるが縦軸は  $1/3$  回転数成分、危険速度成分、2 倍の回転数成分を監視することによりそれぞれの振動要因の監視診断を行なうことができる。

(45)

特開 昭55-101705(12)

振幅 100  $\mu$  (peak to peak) に対する比で [dB] で表わすとか全周波数 (over all frequency) 成分に対する比で [dB] で表わすとか、あるいは絶対値などいろいろな表現方法がある。縦軸はこの場合、回転数成分の  $1/2$  の周波数成分の場合であるが横軸と同様に [dB]、あるいは絶対値で表わされる場合が多い。

第 14 図で U は昇速運転領域、H は当該回転速度で保持運転する領域、D はより低速の過渡速度で運転する領域、T は運転停止のトリップ領域である。すなわち U 領域にある場合は例えば第 13 図(b)に示したような起動スケジュール (または昇速スケジュール) にしたがって昇速を続ければよい。起動スケジュール信号は例えば第 10 図の起動スケジュール装置 46 から与えられる。

H 領域にある場合はあらかじめ定められた保持時間その回転数で保持運転を行なう。ある保持時間を越えてもなお H 領域にある場合は、さらに下位の低速過渡速度まで回転数を下げて運転する。

ここで下位の低速過渡領域とは例えば第 13 図(a)

(44)

以上をまとめて本発明の異常診断による運転制御方法を第 15 図に示すフロー図により説明する。

入力処理ステップ 301 は、タービン及び発電機の回転数 (rpm) ならびに各軸受部で測定された軸振動信号 X を入力する (標本数 N 個  $\times$  チャネル数)。次に初期徴候の抽出ステップ 302 は、(6)式にしたがつて交番係数 ( $A_0 \sim A_{(N-1)}$ ) を求める。次に異常判定ステップ 303 では、(20)式にしたがつて交番数スペクトラム  $|A|$  を求め、正常運転状態の交番数スペクトラム  $|A_{normal}|$  との偏差をとり、あらかじめ定められた小さな値 L との大小関係を判定する。もし

$$|A| - |A_{normal}| \geq L$$

であれば、その時のタービン速度が第 13 図の(A)~(D)のどの速度領域にあるかをステップ 304 ~ 307 で判定する。(A)~(D)は 1st, 2nd, 3rd, ..., 5th の危険速度を中心にある範囲を避けてあらかじめ定められた速度領域である。そしてそれぞれの回転数領域に対応したパターン I ~ IV をステップ 308 ~ 311 で選択する。

(46)

パターンⅡの例を第15図(c)に示す。パターンⅢ、Ⅳも横軸、縦軸は同一であるが、U, H, D, Tの設定レベルが異なってくる。パターンⅠはFIG. 15(d)に示すように縦軸が $1/2 R$ ,  $1/3 R$ の場合である。パターンⅠの場合は第1危険速度以下だから $R_c$ は問題にしないでよい。

パターンⅣはパターンⅡ, Ⅲ (FIG. 15(c)) の場合の縦軸に $2 R$ 成分が追加される。

いまタービン速度が第13図の(B)領域であつたとするとパターンⅡが選択される(ステップ309)。次のステップ316(第15図(c))では式(17)によるWFT処理が行なわれ交番数係数から周波数成分を示すフーリエ係数 $a$ に変換される。この時の縦軸は、第15図(c)から明らかのように $1/2 R$ ,  $1/3 R$ ,  $R_c$ であるから、式(17)で対応する部分のみ選択して演算すればよい。例えば $a_0$ ,  $b_{1/2} a$ ,  $a_{1/2} a$ ,  $b_{1/3} a$ ,  $a_{1/3} a$ ,  $b_{R_c} a$ ,  $a_{R_c} a$ の要素の演算を、そしてFIG. 15(c)の横軸の回転周波数成分については同じく式(17)で $b_a$ ,  $a_a$ の対応要素の演算を行な

(47)

また以上の説明ではあらかじめ定められた周波数成分、例えば $1/2 R$ についての周波数成分を演算する場合について述べたが、その前後について演算して平均スペクトルを演算する方法でもよい。その場合は、式(17)で $b_{(1/2 R \pm 1)}$ ,  $b_{(1/2 R - 1)}$ , と $b_{(1/2 R)}$ ,  $a_{(1/2 R \pm 1)}$ ,  $a_{(1/2 R - 1)}$ , と $a_{(1/2 R)}$ について演算を行なえばよい。

また特定周波数成分の前後一定領域について平均値を求める方法であつてもよい。例えば $1/2 R$ を基準に一定周波数領域 $r$ を考えて $(\frac{1}{2} R \pm r)$ について演算を行なう方法であつてもよい。すなわち式(17)の例では $b_{(1/2 R \pm r)}$ ,  $a_{(1/2 R \pm r)}$ について演算を行なうことになる。第1表の $p=1$ , の場合の $i=29, 30, 31$ は、いわゆる $(\frac{1}{2} R \pm 1)$ の場合の例である。ここでは $m_1=6$ を選択しているのだから $(\frac{1}{4} R \pm 1)$ の場合、すなわち $i=14, 15, 16$ の場合も含めて演算できる例を示している。

このように選択された周波数の前後、あるいは選択された周波数の前後のある領域を含めた平均

(49)

ればよい。

次のステップ317~320では、その結果第15図(c)に示した運転パターンU, H, D, Tのどの領域の振動信号かをパターンⅡの場合は $\frac{1}{2} R$ ,  $R_c$ ,  $1/3 R$ について判定する。そしてそれぞれ対応する速度制御(ステップ321~324)を行なう。具体的には第10図における目標回転数設定装置47においてあらかじめ定められている起動スケジュール信号に優先して速度制御装置55の設定値として与えられる。優先レベルは $T > D > H > U$ の関係にあり、選択されたものの中で最上位のもので運転される。そしてステップ313で振動スペクトラムの表示(例えばCathod Ray Tube表示)処理などを行ない、全てのチャンネルについて処理が終了かどうかを判定し(ステップ314)、終わっていなければ他のチャンネルを選択(ステップ315)して同様の処理を繰り返すのである。ここでチャンネルというのは、第10図の振動検出器39~45のことを意味する。

(48)

の周波数成分で回転機の状態を診断することは、振動検出器からのノイズ信号などによる誤診断が避けられること、サンプリングの位相ずれの補償が行なえる効果がある。これをパターンⅡの例で示すと第15図(d)のように表わすことができる。

なおFIG. 15(A) ステップ303では |Anormal| との偏差をとっているが、回転機によるバラツキを吸収できる効果がある。

第16図(a)~(d)は本発明の効果の1つを説明するための図面である。

同図(a)において、現在の運転速度における振動振動信号を同図(b)であつたとする。この波形は振動振幅も小さいので従来のように平均値方式では何ら異常が検知されず、やがて同図(c)に示すようにオイルホワール(Oil Whirl)現象が発生して過大振幅の振動が発生する。これに対し本発明のように周波数分析を行ないそのスペクトラムを監視すると図(d)の時点であらかじめオイルホワールの徴候を検知することができるのである。同図(d)の●印のスペクトラムがそれを表わしている。実

(50)

験機の固有振動周波数が225(Hz)の場合でこの周波数におけるスペクトルが他の周波数に比較して特に大きくなっていることが分るであろう。これはとりもなおさずオイルホールの微振が表われていることを意味する。

したがって本発明によれば、振動振幅値が小さい場合、あるいは振動振幅平均値が小さい場合であつても、これから発生しうであろう異常振動を予測することが可能である。したがって異常振動を早期に検知し、安全な運転制御を行なうことが可能となるのである。

なお第16図(4)の縦軸は入力振動波形の peak-to-peak の値で正規化した周波数スペクトルを示している。

また第17図は本発明を適用した場合と従来技術で起動運転を行なった場合の対比の例を示す。本発明を適用した場合を実線で示したが、点▽で異常を検知すると一旦低速避避領域で運転し再び昇速し定格回転速度まで昇速する。これに対し従来技術(破線)では、点▽で示したように

(51)

正常時の振動成分が外乱となつて検出がむずかしい。そこで、正常時の振動特性をあらかじめ記憶しておきこれとの偏差を監視すれば、高感度に異常特性を検出できることになるが、従来の時間領域での監視では、記憶されている正常時の振動波形と毎回測定される振動波形との位相を合わせることがむずかしい。

本実施例では交番数係数に変換して正常時の特性と比較するので、位相の影響を考慮する必要はなくなる。

また本発明の実施例はデジタル信号による周波数分析の場合について述べたが、アナログ方式であつてもよい。ただその場合には回転機の回転速度に応じてアナログフィルタの時定数が自動的に変えられるフィルタが必要になる。それは例えばFIG. 15(4)に示したように回転周波数と相対関係にある周波数について、周波数成分を分析する必要があるからである。ただし回転機の特性から決まる固有振動周波数用フィルタの時定数は固定でよい。

(53)

異常検知が遅れるために振動振幅平均値がトリップ領域に入つてしまつているから直ちにトリップし、異常の原因を究明後再び起動を行なう。このように本発明は早期に異常を検知できるので不要なトリップをさけることができる。

また測定された交番数スペクトラムAと標準値A<sub>0</sub>の偏差eをあらかじめ定められた許容値と比較監視して異常判定してもよい。これらの関係を式(20)~(22)に示す。

$$|A| = \sqrt{A_{1k}^2 + A_{2k+1}^2} \quad (20)$$

$$\text{ただし } k = 0 \sim \left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

$$|A_0| = \sqrt{A_{1k}^2 + A_{2k+1}^2} \quad (21)$$

$$e = |A| - |A_0| \quad (22)$$

タービンおよび発電機などの回転体においては、製作、施行上、ある程度の残留アンバランスがあるので、回転時にはこれが加振力となり、正常状態でも回転数成分を中心に軸振動を生ずる。したがって、異常現象が発生しても初期の間は、この

(52)

ただ定格回転数で運転中の異常診断を行なうような場合は、それぞれ専用フィルタを設ける方法であつてもよい。

#### 図面の簡単な説明

第1図は大型タービン発電機の結合状態のスケッチを示す。第2図は軸受に取付けられる振動振幅検出器の取付状況およびその信号処理のブロック図を示す。第3図はFHTによる振動信号分析方法のブロック図を示す。第4図は横軸が時間t、縦軸を振動振幅rで表わされる振動振幅特性の例を示す。第5図はA/D変換器、FHT変換器そして帯域平均周波数変換器との詳細図を示す。第6図はFHT変換器による演算の詳細フロー図を示す。第7図は第6図に示したFHT変換の演算と線形変換をデジタル計算機によつて行なう場合のフロー図を示す。第8図は前述したFig. 6のFHT演算と線形変換とを組合わせた場合の一実施例の演算フロー図である。第9図は第8図の演算をデジタル計算機によつて実施した場合の演算フロー図である。第10図は振動による診断

(54)



を行なつて、実際にタービンの速度制御を行なう場合のブロック図を示す。第11図はFig. 10に示した振動診断装置のより具体的なブロック図を示す。第12図はFig. 11で示した各部の信号波形の一例を示している。第13図(a)は回転機の回転速度と振動振幅の関係と選避速度領域を、同図(b)は起動スケジュールと前記選避速度領域の関係を示す。第14図は分析した周波数成分による運転パターンの1例を示す。第15図(A)(B)は振動信号の周波数分析と運転制御方法を説明するためのフロー図を(C)(D)は運転パターンの1例を示す。第16図(a)回転速度に対するホイールホル Lubing による振動振幅の一例を、(b)は上記(a)の▽点における振動振幅信号の1例を、(c)はホイールホルによる点▽の振動振幅信号の1例を、(d)は(a)の▽▽点における周波数スペクトラムの1例を示す。第17図は起動時における本発明と従来技術による場合との比較例を示している。1〜6…ベアリング、11…シャフト、12…振動検出器、13…サンプルホールド回路、14…

A/D変換器、15…FFT変換器、16…FHT変換器、17…帯域平均周波数変換器、46…タービン起動スケジュール制御装置、47…目標回転数設定装置、48…振動診断装置。

代理人 弁理士 高橋明夫

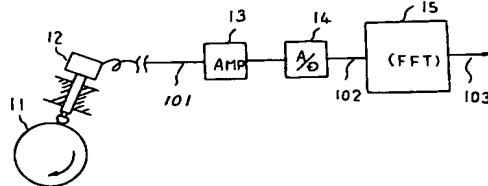
(55)

(56)

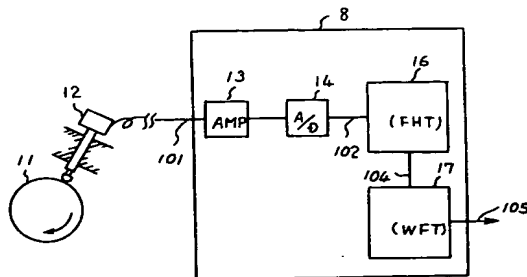
第 1 図



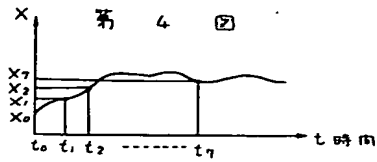
第 2 図



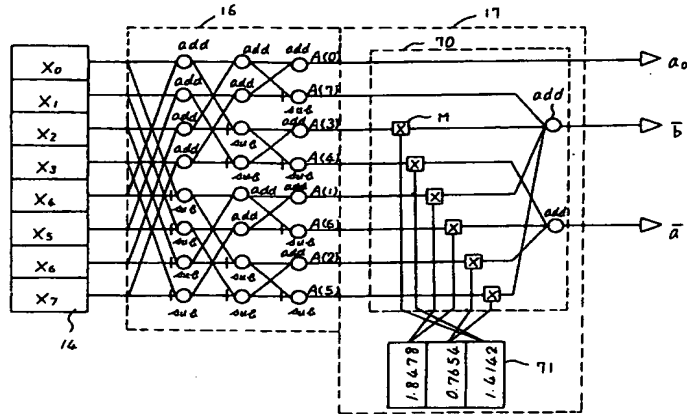
第 3 図



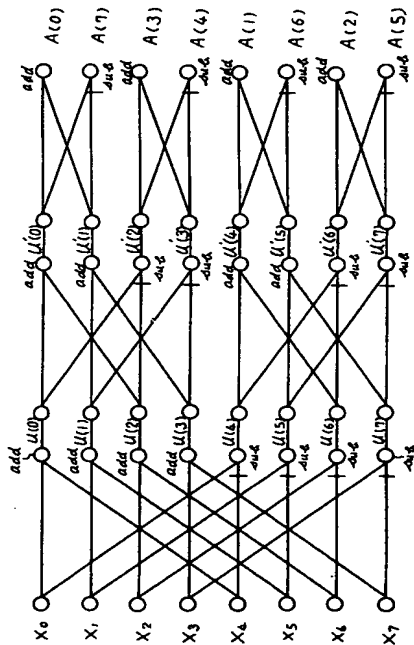




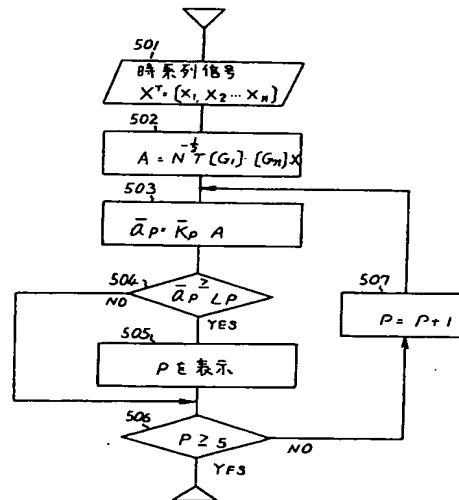
第 5 図



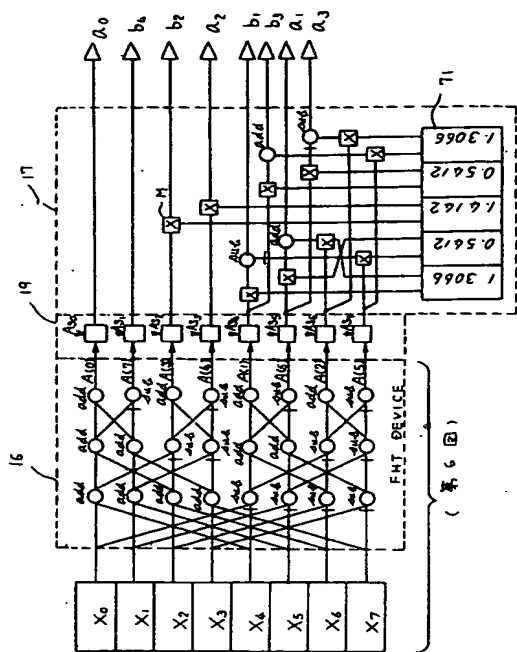
第 6 図



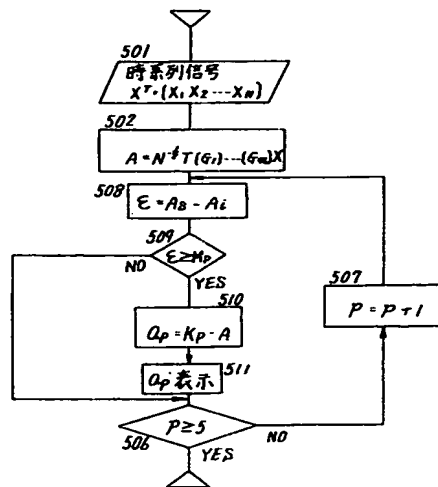
第 7 図



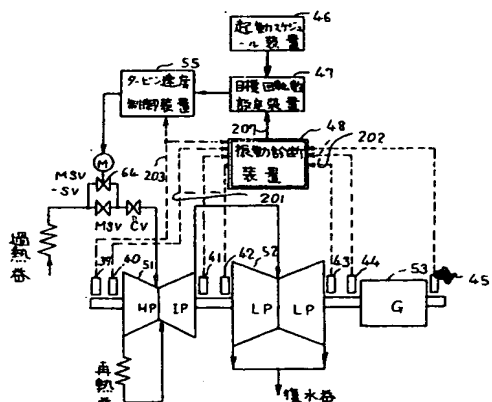
第 8 図



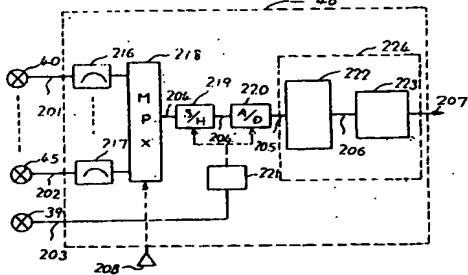
第 9 図



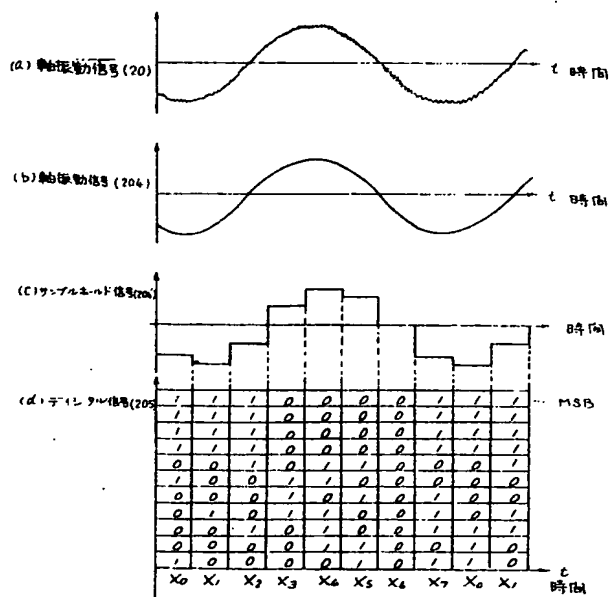
第 10 図



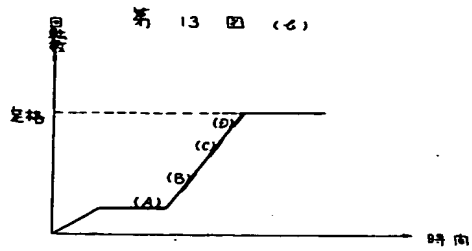
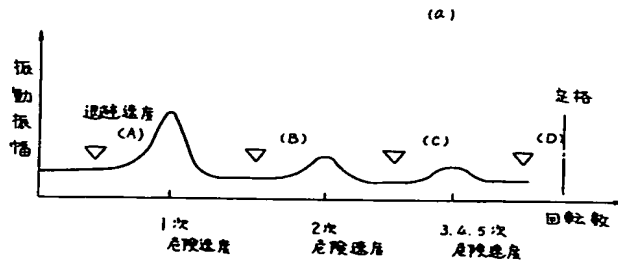
第 11 図



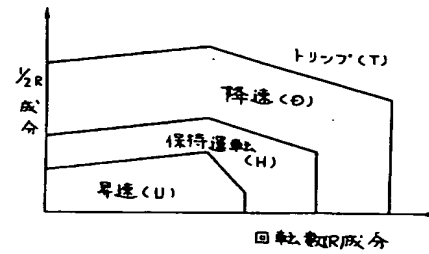
第 12 図



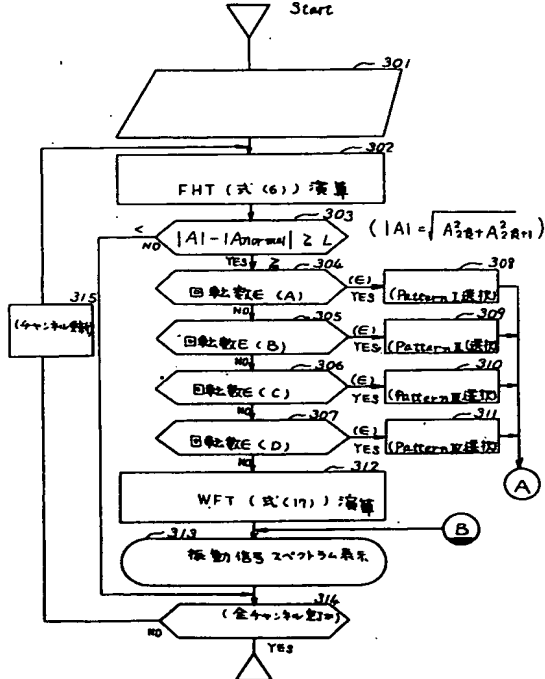
第 13 図 (a)



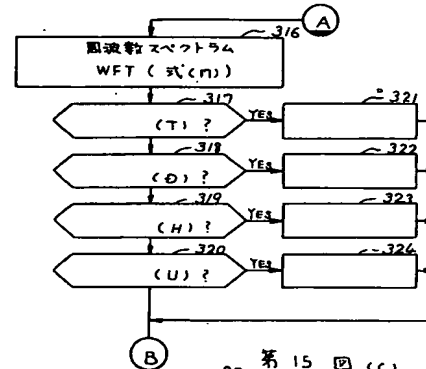
第 14 図



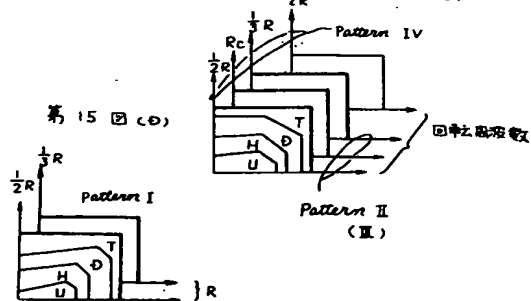
第 15 図 (A)



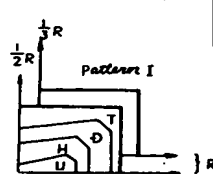
第 15 図 (B)



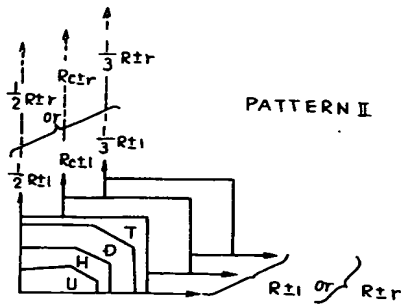
第 15 図 (c)



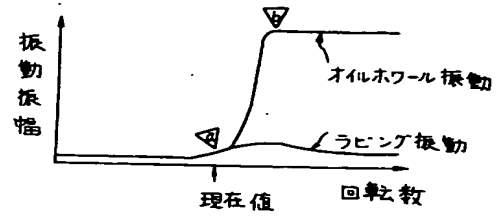
第 15 図 (d)



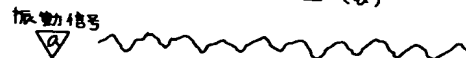
第 15 (E)



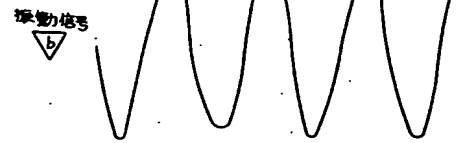
第 16 図 (a)



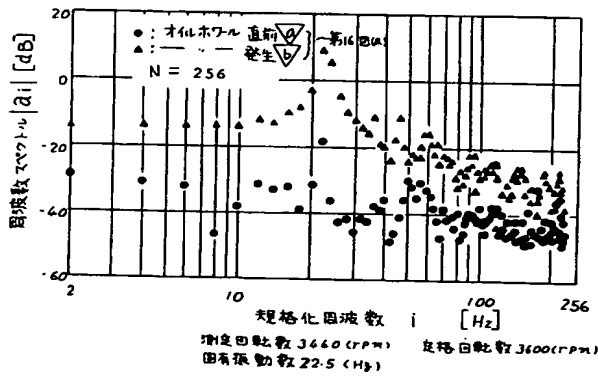
第 16 図 (b)



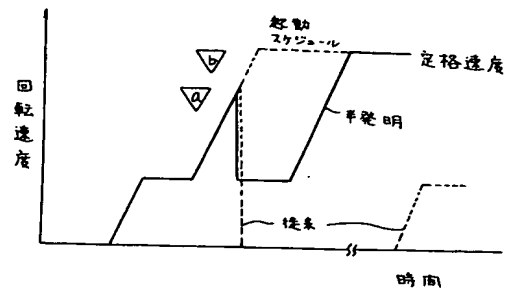
第 16 図 (c)



第 16 図 (d)



第 17 図



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☒ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked; please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**